

人体熱モデルによるヒト運動時における局所産熱量の推定

熱エネルギー工学研究室

松下 純

1. 緒言

ヒトは体内で産出した熱を周囲環境に逃がすことにより熱的快適性を維持している。熱的快適性は代謝に伴う産熱量に関係しており、人体の総産熱量は実験などから測定することができるが、人体の部位毎の局所産熱量は測定が困難である。そこで本研究では、人体を部位毎に分割した人体熱モデルを用いて数値解析を行い、安静時および運動時における局所産熱量および人体から周囲への熱伝達量を検討した。

2. 解析方法

本解析では人体を6部位（頭、胴体、腕、手、脚、足）に分割し、分割した各部位をさらに4層（体幹、筋肉、脂肪、皮膚）に分割し、これに中央血液溜まり(*central blood*)を加え25分割した人体熱モデルを用いる⁽¹⁾。人体や人体周囲の物理量を入力することにより、生理量を数値計算で求めるモデルである。

本モデルにおいて、分割部位 i ; 分割層 j における局所産熱量 $Q(i,j)[W]$ は式(1)より求める。

$$Q(i,j) = Q_b(i,j) + W(i,j) + Ch(i,j) \quad (1)$$

ここで、 $Q_b(i,j)$ は各部位の基礎代謝量[W]、 $W(i,j)$ は外部仕事による産熱量[W]、 $Ch(i,j)$ はふるえ産熱量[W]を表す。外部仕事とふるえによる産熱量は、筋肉層($j=2$)のみで発生する。

皮膚層における蒸発による周囲への熱伝達量 $Q_{eva}(i)$ は式(2)から求める。

$$Q_{eva}(i) = \{CSW \times ERROR(1,1) + SSW \times (WARMs - COLDS) + PSW \times WARM(1,1) \times WARMs\} \times SKINS(i,j) \times 2.0 \times ERROR(i,4) / 10 \quad (2)$$

ここで、 $CSW[W/^\circ C]$ 、 $SSW[W/^\circ C]$ 、 $PSW[W/^\circ C]$ はそれぞれ頭部の体幹層、各部位の皮膚層、頭部の体幹層と各部位の皮膚層からの発汗制御係数、 $ERROR(1,1)[^\circ C]$ はエラーシグナル、 $WARMs[^\circ C]$ 、 $COLDS[^\circ C]$ はそれぞれ皮膚温受容器および皮膚冷受容器の重み係数、 $WARM(1,1)[^\circ C]$ は温シグナル、 $SKINS(i,j)[^\circ C]$ は発汗についての各部位皮膚層の分布係数、 $ERROR(i,4)[^\circ C]$ は各部位皮膚層のエラーシグナルを表す。

伝導と対流による周囲への熱伝達量 $Q_c(i)[W]$ は式(3)、ふく射による周囲への熱伝達量 $Q_r(i)[W]$ は式(4)から求める。

$$Q_c(i) = h_c(i) \times (T(i) - T_{air}) \quad (3)$$

$$Q_r(i) = h_r(i) \times (T(i) - T_{air}) \quad (4)$$

ここで、 $h_c(i)$ は伝導と対流による総合熱伝達率 $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$ 、 $h_r(i)$ はふく射による熱伝達率 $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$ 、 $T(i)$ は各部位の皮膚層温度 $[^\circ C]$ 、 T_{air} は周囲温度 $[^\circ C]$ を表す。

本解析では、運動の種類は自転車エルゴメータ運動を想定し、室内温度 $30^\circ C$ 、相対湿度 30% 、気流速度 $0.1m/s$ とする。解析条件として運動に要する代謝量(work)を $250W$ 、 $500W$ と

した場合と安静時(work=0W)を与えた場合に対して解析を行った。

3. 解析結果および考察

表1に運動に要する代謝量と局所産熱量の関係を示す。局所産熱量は主に胴体と脚部での割合が大きく、運動に要する代謝量が増加するにつれて局所産熱量も増加している。また、頭部からの局所産熱量は運動に要する代謝量の増減にかかわらず一定の値を示している。

図1に運動に要する代謝量に対する熱伝達量を示す。運動に要する代謝量が増大するにつれて、特に蒸発による熱伝達量が增大している。この結果から、体は胴体、脚部で産熱される割合が高く、熱伝達は蒸発によって行う割合が高いことが分かる。

表1 局所産熱量

	work [W]		
	0	250	500
頭	15.27	15.27	15.27
胴体	61.53	99.79	158.28
腕	2.27	12.47	28.06
手	0.42	1.70	3.64
脚	6.79	83.29	200.29
足	0.30	1.58	3.52

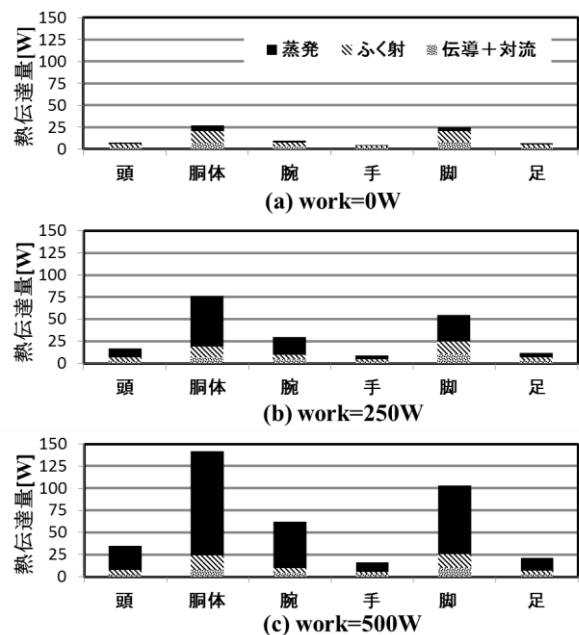


図1 運動に要する代謝量に対する熱伝達量

文献

- (1) J. A. J. Stolwijk, A MATHEMATICAL MODEL OF PHYSIOLOGICAL TEMPERATURE REGULATION IN MAN, NASA Contractor Report 1855 (1971)